

気流と木材燃焼の連成解析法を用いた一次元および二次元延焼解析

日本大学 学生会員 ○大木 薫仁

日本大学 正会員 長谷部 寛

1. はじめに

風は火災の延焼速度を増幅させるため、強風が吹くと林野火災の被害が急激に拡大する¹⁾。そこで本研究室では森林における局所的な地形の起伏や、風況の変化を考慮出来るよう、林野火災予測のためのシミュレーション法を構築している²⁾。これまでの研究では単一の木材要素を配置した燃焼解析であったため、実際の林野火災予測のためには多数の木材要素を配置した延焼解析を行う必要があった。

そこで本研究では木材要素を横一列に配置した一次元空間の延焼解析を行い、また現段階の木材燃焼モデルを用いて、今までよりも領域を拡張した二次元空間で延焼解析を試みたので報告する。

2. 解析手法

本研究で用いる解析手法は気流解析と木材燃焼解析をそれぞれ解く連成解析法である。

(1) 気流の支配方程式

気流の解析手法は低マッハ数近似を適用した圧縮性流体方程式をVMS有限要素法により離散化したものである³⁾。

連続条件式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + g_i(\rho - \rho_0) + \rho f_i \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

エネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_r \quad (4)$$

状態方程式

$$p^0 = \rho T \quad (5)$$

ここで、 u_i は流速、 ρ は空気密度、 T は温度、 C_p は比熱、 f は外力、 σ_{ij} は応力テンソル、 g_i は重力加速度、 ρ_0 は初期の空気密度、 p は流体力学的圧力、 μ は粘性係数、 k は熱伝導率、 S_r は外部の熱量、 p^0 は熱力学的圧力である。

(2) 木材燃焼の基礎方程式

ここで用いる木材燃焼の解析にはMorvanらのモデルを改良して用いた⁴⁾。木材の温度は以下の微分方程式から求められる。

$$m_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = D_m + Q_c + Q_r \quad (6)$$

$$D_m = -L_{H_2O} \omega_{H_2O} - L_p \omega_p - \alpha_{sg} L_c \omega_c \quad (7)$$

$$Q_c = h_c \alpha_s \sigma_s (T_g - T_s) \quad (8)$$

$$Q_r = Q_{r1} + Q_{r2} \quad (9)$$

$$Q_{r1} = \alpha_s \frac{\alpha_s \sigma_s}{4} (4\sigma T_g^4 - 4\sigma T_s^4) \quad (10)$$

$$Q_{r2} = \alpha_s \frac{\alpha_s \sigma_s}{4} (4\sigma T_s^4 - 4\sigma T_{s,d}^4) \quad (11)$$

ここで T_s は木材の温度であり、時間積分項 dT_s/dt は差分近似して解く。木材温度の微分方程式の右辺にある D_m は木材の化学反応に伴い生成される熱量、 Q_c 、 Q_r はそれぞれ対流熱伝達、放射熱伝達である。 Q_{r1} は木材と周辺空気間、 Q_{r2} は隣接木材間の放射熱伝達である。木材間の放射熱は解析対象の木材要素が一つ目以降の場合に全体の熱量に加えられる。また、 m_s は木材の質量、 α_s は木材の充填率、 D_m は木材の反応に対する生成熱、 C_{ps} は木材の比熱(=1300[J/(kg・K)])、 ω_{H_2O} は水分の反応速度、 ω_p は乾燥木材の反応速度、 ω_c は炭化木材の反応速度、 T_g は空気の温度、 $T_{s,d}$ は下流側の木材の温度である。モデルパラメータとして、 $L_{H_2O} = 2.26 \times 10^6$ [J/kg]、 $L_p = 4.18 \times 10^2$ [J/kg]、 $L_c = -1.2 \times 10^7$ [J/kg]、 $\alpha_{sg} = 0.5$ 、 $h_c = 100$ [W/(m²・K)]、 σ はステファンボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸[W/(m²・K)])とした。木材燃焼プロセスの各段階での反応速度はアレニウスの法則に基づき次式のようにモデル化される。

$$\omega_{H_2O} = \alpha_s \rho_s Y_{H_2O} k_{H_2O} T_s^{\frac{1}{2}} \exp(-E_{H_2O}/RT_s) \quad (12)$$

$$\omega_p = \alpha_s \rho_s Y_p k_p \exp(-E_p/RT_s) \quad (13)$$

$$\omega_c = \frac{1}{v_{O_2}} \alpha_g \rho_g Y_{O_2} k_c T_s^{\frac{1}{2}} \exp(-E_c/RT_s) \sigma_s \quad (14)$$

ここで、 ρ_s は木材の密度、 Y_{H_2O} は湿潤木材の質量分率、

キーワード 林野火災、延焼解析、延焼速度、木材燃焼モデル

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14

Y_p は乾燥木材の質量分率, α_g は空気の充填率, ρ_g は空気の密度である. モデルパラメータとして, $k_{H_2O} = 6.05 \times 10^5 [K^{1/2}/s]$, $E_{H_2O}/R = 5956 [K]$, $k_p = 3.64 \times 10^4 [1/s]$, $E_p/R = 7250 [K]$, $k_c = 4.30 \times 10^2 [K^{1/2}/s]$, $E_c/R = 9000 [K]$, $\sigma_s = 4550$, $Y_{O_2} = 0.2$ とした.

3. 一次元の解析条件および延焼解析の結果

図1に示すように1要素あたり幅, 高さ0.01mの木材要素を横一列に60要素並べた一次元空間を対象に延焼解析を行う. 木材周辺の空気が1sあたり0.167K上昇する状況を想定する. 境界条件は, 一次元的な延焼を表現するため, 左側面に一様に風速0.01m/sを与えた. 延焼解析の結果を図2に示す. 続いて, 過去に実験で測定した延焼速度⁵⁾との比較結果を図3に示す. 延焼速度の評価方法は, 木材の発火温度である500K(226.85℃)に達した時刻を基準とし, 500Kに達した要素までの距離を燃焼時間で除して算出する. 延焼解析の結果, 200sで0.16mまで500Kに達し, 延焼速度は0.8mm/sであった. ただし解析による延焼速度の値は実験による値よりも小さい結果となった.

4. 二次元の解析条件および延焼解析の結果

次に, 図4に示すように1要素あたり幅, 高さ0.01mの木材要素を縦20要素, 横80要素並べた二次元空間を対象に延焼解析を試験的にを行った. 木材周辺の空気が1sあたり0.167K上昇する状況を想定する. 境界条件は底面中央2要素を木材要素とし, 延焼を表現するため左側面に一様に風速0.01m/sを与えた. 解析の結果を図5に温度分布, 図6に流速分布を示す. 最終的に右側面から解が発散してしましたが, 途中まで風により熱が広がる様子を確認した.

今後は, 延焼速度の過小評価に対しては, 実験で用いたクヌギの枯葉に類するパラメータ設定, 木材燃焼モデルを用いた2次元解析では安定な解析の実現が課題となる.

5. まとめ

本研究では, 火災の延焼に及ぼす放射の影響を, 木材を一次元的に配置した解析で検討した. その結果, 木材間の放射を考慮すると, 延焼速度が増加するが, 実験結果よりも過小評価された. 二次元的に配置した解析では風による熱の拡がりを確認した. 今後は二次元空間での延焼解析の条件と解析に用いるパラメータを検討する必要がある.

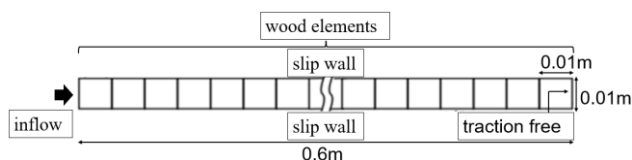


図1 一次元解析の領域と境界条件



図2 一次元空間での延焼解析結果（温度分布）

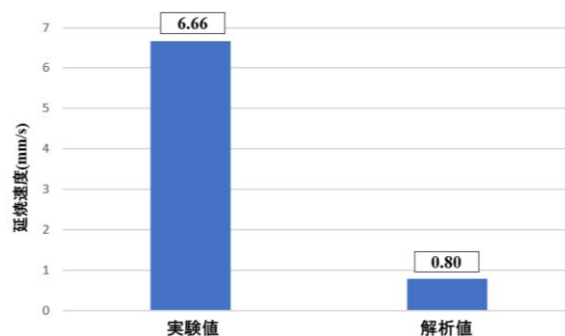


図3 延焼速度の比較

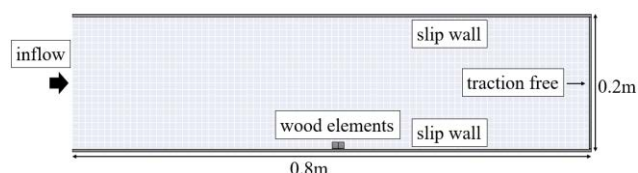


図4 二次元解析の領域と境界条件

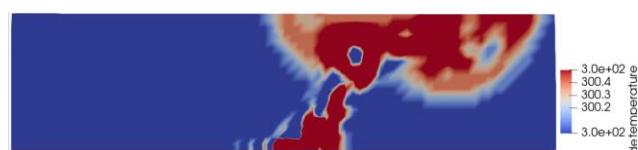


図5 二次元空間での延焼解析結果（温度分布）

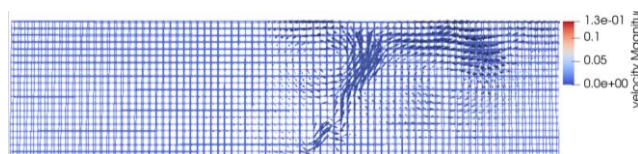


図6 二次元空間での延焼解析結果（流速分布）

参考文献

- 1) 林野庁 HP : <https://www.rinya.maff.go.jp/>, (閲覧日 2022 年 9 月 30 日)
- 2) 長谷部寛ら: 気流と木材燃焼の連成解析に基づく林野火災シミュレーション法の開発, 日本風工学会誌, Vol.36, No2, pp.201-202, 2011
- 3) 長谷部寛ら: VMS 有限要素法によるキャビティ内の自然対流の解析, 計算工学講演会論文集, 22 巻, pp.4-7, 2017
- 4) Morvan, D.et.al: Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation, Combustion and Flam, Vol.127, pp.1981-1994, 2001
- 5) H. Hasebe.et.al: An Attempt to Measure the Speed of Fire Spread in the Wind, international conference proceedings, Vol.1, pp.321-322, 2019